

Spline-Interpolation in der Steuerung einer Werkzeugmaschine

J. Huan, Peking

Um die Programmierung bei der Bearbeitung von Freiformkurven und -flächen zu vereinfachen und den Lochstreifenumfang zu vermindern, wurde ein Verfahren für die Interpolation von Splinefunktionen in einer CNC entwickelt. In diesem Beitrag werden das Verfahren und die daraus resultierenden Bearbeitungsergebnisse erläutert.

0 Einleitung

Aus dem Schrifttum sind Entwicklungen bekannt, bei denen die Werkzeugbahn zur Bearbeitung von sogenannten Freiformkurven und -flächen mit Hilfe kubischer Polynome (Spline¹-Funktionen) beschrieben wird (Bild 1). Da sich die Interpolationsfähigkeit heutiger numerischer Steuerungen meist auf die lineare und zirkulare Interpolation beschränkt, muß die von der Splinefunktion dargestellte Werkzeugbahn durch viele kleine Linearschritte angenähert werden, die über einen NC-Lochstreifen in die Steuerung eingegeben werden. Die numerische Steuerung erzeugt Bewegungen entlang den Geradenstücken. Es ist festzustellen, daß infolge der Diskrepanz zwischen der Interpolationsfähigkeit der numerischen Steuerung und der mathematischen Beschreibung der Werkzeugbahn ein beträchtlicher Anstieg der NC-Eingabedaten verursacht wird. Daher kann ein Lochstreifen für die Bearbeitung großer Freiformflächen eine Länge von einigen hundert, ja sogar tausend Metern erreichen. Die Verwendung der Möglichkeiten von DNC (Direct Numerical Control) sowie große Speicherkapazitäten in der CNC zur Bewältigung der großen Datenmengen sind unbedingt notwendig, erhöhen aber die Systemkosten beträchtlich [1...4].

Es wurde deshalb vom Verfasser ein Verfahren zur direkten Interpolation der Splinefunktion entwickelt und in einer CNC verwirklicht. Die neue CNC kann die Parameter kubischer Splinefunktionen, die die Werkzeugbahn darstellen,

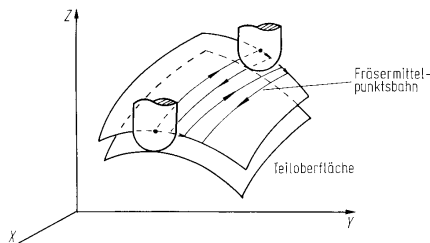


Bild 1. Fräsermittelpunktsbahnen zum Fräsen einer Werkstückoberfläche in den Achsen X, Y und Z

als NC-Eingabeinformation einlesen und die geforderten Maschinenbewegungen entlang einer Bahnkurve erzeugen. Mit der neuen CNC wird das oben geschilderte Problem ausgeräumt und eine Lücke zwischen der Werkzeugbahnbeschreibung und der Bahninterpolationsfähigkeit der CNC geschlossen.

1 Mathematische Grundlagen

Eine kubische Splinefunktion ist eine glatte Kurve, die durch eine Gruppe frei wählbarer Stützpunkte beschrieben wird (Bild 2). Bild 3 stellt ein beliebiges Kurvenintervall zwischen zwei Stützpunkten dar. \vec{A} und \vec{B} sind Ortsvektoren mit den Endpunkten a und b und den Tangentenvektoren

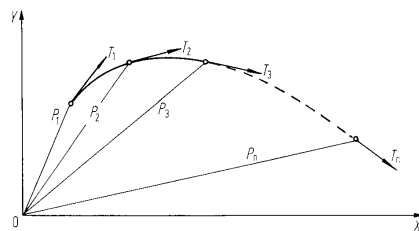


Bild 2. Darstellung einer Fräsermittelpunktsbahn mit Hilfe einer Splinefunktion in der X-Y-Ebene. $\vec{P}_1 \dots \vec{P}_n$ Stützpunktvektoren $\vec{T}_1 \dots \vec{T}_n$ Tangentenvektoren

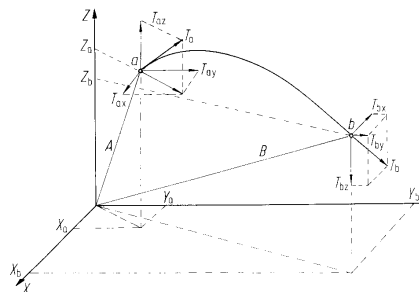


Bild 3. Räumlicher Kurvenverlauf zwischen den Stützpunkten a und b. \vec{T}_a, \vec{T}_b Tangentialvektoren; \vec{A}, \vec{B} Stützpunktvektoren; X, Y, Z Achsen

\vec{T}_a und \vec{T}_b . Die Punkte P auf der Kurve zwischen den Stützpunkten a und b ergeben sich aus:

$$\vec{P}(u) = \vec{R}_3 u^3 + \vec{R}_2 u^2 + \vec{R}_1 u + \vec{R}_0. \quad (1)$$

Der Parameter u nimmt dabei Werte zwischen 0 und 1 an. Die Koeffizienten-Vektoren \vec{R}_0 , \vec{R}_1 , \vec{R}_2 und \vec{R}_3 ergeben sich aus den Vektoren \vec{A} , \vec{B} , \vec{T}_a und \vec{T}_b :

$$\begin{aligned} \vec{R}_0 &= \vec{A} \\ \vec{R}_1 &= \vec{T}_a \\ \vec{R}_2 &= 3(\vec{B} - \vec{A}) - 2\vec{T}_a - \vec{T}_b \\ \vec{R}_3 &= 3(\vec{A} - \vec{B}) + \vec{T}_a + \vec{T}_b. \end{aligned} \quad (2)$$

Die Vektoren \vec{T}_a und \vec{T}_b bzw. $\vec{T}_1, \vec{T}_2, \dots, \vec{T}_n$ aus Bild 2 berechnen sich aus folgendem Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} 2\vec{T}_1 + \vec{T}_2 + 0 + 0 + 0 + \dots &= 3(\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \\ \vec{T}_1 + 4\vec{T}_2 + \vec{T}_3 + 0 + 0 + \dots &= 3(\vec{P}_3 - \vec{P}_1) \\ 0 + \vec{T}_2 + 4\vec{T}_3 + \vec{T}_4 + 0 + \dots &= 3(\vec{P}_4 - \vec{P}_2) \\ 0 + 0 + 0 \dots \vec{T}_{n-2} + 4\vec{T}_{n-1} + \vec{T}_n &= 3(\vec{P}_n - \vec{P}_{n-2}) \\ 0 + 0 + 0 + \dots \vec{T}_{n-1} + 2\vec{T}_n &= 3(\vec{P}_n - \vec{P}_{n-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

Die Berechnungen nach Gl. (3) werden mit einem NC-Programmiersystem durchgeführt. Die CNC an der Werkzeugmaschine hat nun die Aufgabe, bei ausreichender Vorschubgeschwindigkeit mit genügender Genauigkeit nach den Gln. (1) und (2) die Punkte zwischen den Stützpunkten $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \dots, \vec{P}_n$ zu interpolieren und entsprechende Maschinenbewegungen zu erzeugen.

2 NC-Eingabebefehle bei der Interpolation von Splinefunktionen

Die NC-Eingabebefehle für die Interpolation von Splinefunktionen umfassen die Koordinaten der Stützpunkte (bei Eingabe absoluter Koordinaten) oder die Weginkremente zwischen den Stützpunkten (bei Eingabe inkrementaler Koordinaten) und die Tangentenvektoren in den Stützpunkten.

Weil es noch keine Festlegung für die Eingabe der Stützpunkte gibt, müssen die geltenden NC-Eingabebefehle um Eingabebefehle für Splinefunktionen ergänzt werden. Die neu eingeführten NC-Eingabebefehle sollen die folgenden Anforderungen erfüllen:

- leichte Interpretierbarkeit in der CNC,
- Anpassungsfähigkeit an geltende NC-Eingabebefehle,
- einfache Möglichkeit des Einbezugs in die herkömmliche NC-Satzstruktur.

Der definierte NC-Eingabebefehl für die Interpolation von Splinefunktionen in Verbindung mit herkömmlichen NC-Programmsätzen besitzt folgende Form:

```
N...G06 I...J...K...
X...Y...Z...P...Q...R...;
X...Y...Z...P...Q...R...;
```

```
X...Y...Z...P...Q...R...; CR
```

herkömmliche NC-Programmsätze

Die hier verwendeten Zeichen haben bei inkrementaler Eingabe folgende Bedeutung:

N laufende Satznummer
 G06 vorbereitende Funktion der Interpolation von Splinefunktionen,
 X, Y, Z Weginkremente zwischen Stützpunkten:
 $X = X_{i+1} - X_i, Y = Y_{i+1} - Y_i, Z = Z_{i+1} - Z_i,$

I, J, K Komponenten des Tangentenvektors am ersten Stützpunkt:
 $I = T_{ix}, J = T_{iy}, K = T_{iz},$
 P, Q, R Komponenten des Tangentenvektors an den folgenden Stützpunkten:
 $P = T_{ix}, Q = T_{iy}, R = T_{iz}, i = 2, 3, \dots, n,$
 ; Zeichen zur Trennung des individuellen Bahnabschnittes,
 CR Ende des Datensatzes.

3 Aufbau des Interpolators der Splinefunktion

Die Interpolation der Splinefunktion wird in der CNC programmseitig mit einem Mikrorechner vom Typ MC 68000 vorgenommen. Das Programm enthält eine Rechenvorschrift, die den Gln. (1) und (2) entspricht.

Die wesentlichen Anforderungen an einen praktisch anwendbaren Interpolator der Splinefunktion sind:

- Raumkurven sollen interpoliert werden.
- Die Interpolationsabweichung soll kleiner als 0,01 mm sein.
- Die resultierende Bahngeschwindigkeit soll in weiten Grenzen verstellbar und unabhängig von der Kurvenform sein.
- Die Zeit für die Einzelpunktberechnung soll möglichst kurz sein.

Da die Interpolation nach Gl. (1) viel komplexer als eine lineare oder zirkulare Interpolation und damit sehr zeitaufwendig ist, mußte eine geeignete Rechenmethode entwickelt werden. Es erschien zweckmäßig, ein zweistufiges Interpolationsverfahren zu verwenden (Bild 4). Der Grobinterpolator berechnet hierbei nach Gl. (1) die Grobinterpolationspunkte, während ein Feininterpolator die Punkte auf dem Geradenstück ermittelt. Die zweistufige Interpolation führt somit die Interpolation der Splinefunktion auf eine abschnittsweise lineare Interpolation zurück bzw. nähert die Bahnkurve durch einen Polygonzug an. Da die lineare Interpolation sehr einfach ist und die meisten interpolierten Punkte durch den Linearinterpolator ermittelt werden, wird die Rechenzeit wesentlich verkürzt. Wählt man den linearen Schritt genügend klein, so kann die polynomförmige Bahn innerhalb einer ausreichenden Genauigkeit nachgebildet werden. Die Länge des Geradenstücks hängt von der Größe des Inkrements u ab. Ein geeignetes Parameterinkrement u wird deshalb bei der Interpolationsvorbereitung in Abhängigkeit der geforderten Vorschubgeschwindigkeit gewählt.

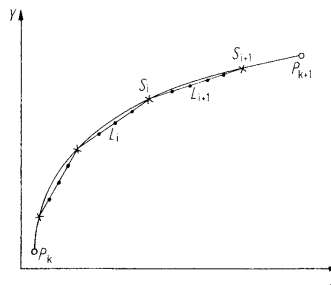


Bild 4. Zweistufige Interpolation zwischen zwei Punkten P_k und P_{k+1} mit Hilfe einer Splinefunktion. S_i Grobinterpolationspunkte, L_i Kurvenabschnitt mit Feininterpolation (linear)

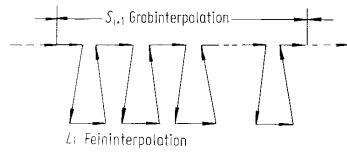


Bild 5. Zeitverhalten des zweistufigen Interpolators der Splinefunktion

Damit ist eine hohe Vorschubgeschwindigkeit bei gleichzeitig ausreichender Bahgenauigkeit zu erreichen. Die Feininterpolation arbeitet mit der Abtastregelung zusammen. Die Abtastzeit wurde durch eine Unterbrechung (Interrupt) auf 4 ms eingestellt. Zu jedem Abtastzeitpunkt berechnet der Rechner den Punkt auf dem Geradenstück und erzeugt die Bewegung der Werkzeugmaschine. Die Ausführungszeit für Feininterpolation und Lageregelung beträgt 1 ms. Die verbleibende Zeit zwischen zwei Abtastzeitpunkten wird für die Grobinterpolation genutzt (Bild 5). Während die Feininterpolation und die Lageregelung ein Geradenstück L_i abarbeiten (Bild 4), berechnet der Grobinterpolator den nächsten Stützpunkt S_{i+1} .

Da ein Geradenstück mindestens aus drei Feininterpolationspunkten bestehen muß, steht im kritischen Fall der Grobinterpolation eine Zeit von 9 ms zur Verfügung. Diese ist für die zeitintensiven Berechnungen nach Gl. (1) ausreichend. Eine Vorschubgeschwindigkeit von 183 mm/s (11 m/min) bei der Interpolation der Splinefunktion wurde schon an einer Versuchseinrichtung erreicht.

Da die Vorschubgeschwindigkeit vom Feininterpolator gesteuert wird, kann sie im ganzen Verfahrensbereich konstant gehalten werden.

4 Anwendungsbeispiel

Bild 6 veranschaulicht noch einmal den Datenfluß für NC-Bearbeitung von Freiformflächen an der NC-Werkzeugmaschine mit und ohne Interpolator der Splinefunktion.

Die Werkstückoberfläche aus Bild 7 wird ebenfalls unter Zuhilfenahme lokal interpolierender Splinefunktionen beschrieben. Aus dieser Teiloberfläche ermittelt ein NC-Programmiersystem die äquidistanten Werkzeugmittelpunktsbahnen und beschreibt diese durch eine kubische Splinefunktion. Während an der herkömmlichen NC-Werkzeugmaschine die Werkzeugbahnen linearisiert werden müssen, sind bei einer CNC-gesteuerten Werkzeugmaschine mit dem Interpolator der Splinefunktion die Bahninformation als NC-Eingabebefehle notwendig. Dies vermindert die Anzahl der in die Steuerung einzugebenden Daten erheblich.

Das Beispiel im Bild 7 zeigt einen Ausschnitt aus einer Turbinenschaukel. Mit einer herkömmlichen numerischen Steuerung würden rd. 1000 NC-Sätze (150 m Lochstreifen) benötigt, während bei einer CNC mit dem Interpolator der Splinefunktion nur 200 NC-Sätze (30 m Lochstreifen) nötig sind. Eine Verringerung der Eingabedaten ist somit durchschnittlich um 70 ... 80% möglich. Dies gilt ebenfalls für die Bearbeitung von freigeformten Konturen in der Ebene.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Interpolation mit Hilfe von Splinefunktion stellt auch die Bearbeitung analytischer Konturen dar. Ein Vorteil drückt sich in der vereinfachten NC-Programmierung aus. Bild 8 zeigt das Fräsen einer ellipsenförmigen Kontur. Dabei wurden 20 Punkte auf der Ellipse als Stützpunkte aufgenommen und in die CNC eingegeben. Die Fräserradiuskompensation wird in diesem

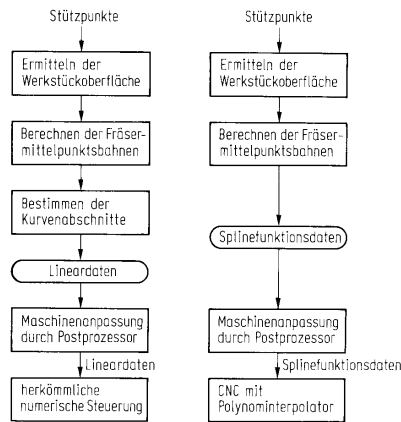


Bild 6. Ablauf der NC-Programmierung und der Datenübertragung bei der Bearbeitung freigeformter Werkstückoberflächen. Links ohne Splinefunktion, rechts mit Splinefunktion

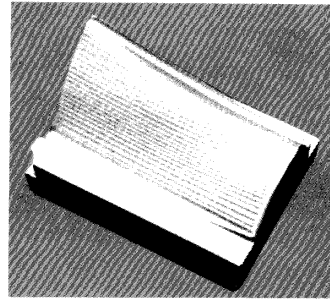


Bild 7. Bearbeitete Turbinenschaukel mit Fräserbahnen nach dem Splinefunktions-Interpolationsverfahren

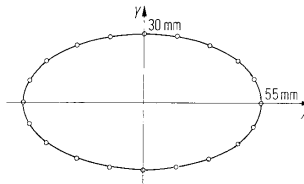


Bild 8. Annäherung einer Ellipsenbahn mit Hilfe einer Splinefunktion

Fall automatisch vom Interpolator der Splinefunktion durchgeführt.

5 Ausblick

Die hier vorgestellte Entwicklung basiert auf dem Leistungsvermögen der in Steuerungen eingebundenen programm- und geräteseitigen Lösungen. Es zeichnen sich jedoch schon heute neue Konzepte ab, die eine wesentliche Steigerung der Rechenleistung erwarten lassen. Der Anwendung im Bereich der Bearbeitung von Freiformflächen

eröffnen sich hierbei neue Programmiermöglichkeiten, deren wesentliche Gesichtspunkte sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Übernahme und Verarbeiten von Elementarflächen, unabhängig von ihrem Bildungsgesetz, z.B. nach *Coons* oder *Bezier*.
- Berechnen der Fräseranstellung an kombinierte Elementarflächen.
- Fräserradius- und Fräserlängenkompensation.

Parallel zu diesen Entwicklungen müssen die Eingabeschnittstellen der Steuerungen überdacht und an die neuen Möglichkeiten angepaßt werden. All diese Maßnahmen führen zu einem wirkungsvolleren Informationsfluß zwischen der rechnerunterstützten Arbeitsvorbereitung (CAP) und der rechnerunterstützten Fertigung (CAM) und damit zu einer wirtschaftlicheren NC-Fertigung von Freiformflächen.

Kurzberichte

Gehrungs-Kreissägemaschine

Auf Kreissägemaschinen GKS (*Bild*) können Vollmaterialien, Rohre oder Profile in Werkstatt und Fertigung wirtschaftlich gesägt werden, und zwar sowohl im üblichem 90°-Schnitt als auch im Gehrungsschnitt nach links und rechts bis 45°. Das senkrecht von unten her arbeitende Sägeaggregat kann um 180° geschwenkt werden. Die Bauweise erleichtert die Material- und Teilehandhabung im Spannungsbereich oberhalb des Auflageschusses. Das Material wird grundsätzlich beidseitig des Sägeblattes gespannt, so daß auch kurze Reste oder unförmige Werkstücke gehalten werden können. Der hierfür verwendete Senkrechtschraubstock wird manuell voreingestellt und über einen Kurzhubzylinder betätigt. Die Kreissägemaschine GKS steht als Säge-Teilautomat oder als Sägeautomat zur Verfügung. Als Werkzeug dient ein Segment- oder Vollstahlsägeblatt mit 400 mm Durchmesser, der Schnittbereich beträgt 130 mm im Durchmesser bzw. 120 mm x 120 mm bei Vierkant- und 240 mm x 80 mm bei Flachmaterial. K 1512

(Hersteller: Karl Stolzer GmbH & Co., Maschinenfabrik, Postfach 1460, 7590 Achern, ☎ (07841) 610, ☐ 752223)

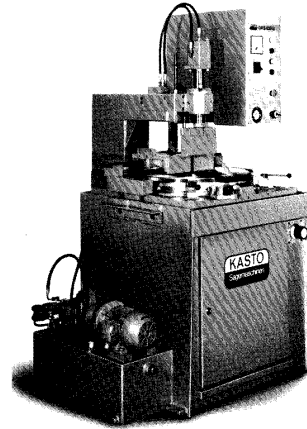
Kreissägemaschine für Gehrungsschnitte

Schrifttum

1. Sata, T.; Kumura, F.; Okada, N.; Hosaka, M.: A new Method of NC-Interpolation for Machining the Sculptured Surface. *Annals of CIRP* (1981) Nr. 1
2. Kochan, D.; Zehe, K.-H.: Effektiver Datenfluß durch softwaremäßige Funktionserweiterung der NC-Fräsbearbeitung. *Messen, Steuern, Regeln* (1984) Nr. 2
3. Pressmann, Roger S.; William, John E.: *Numerical Control and Computer-Aided Manufacturing*. John Wiley and sons, Inc. 1977
4. Ridder, D.; Brandmayr, H.-P.: EDV-technische Konzepte für die Fräsbearbeitung freier Oberflächen. *ZwF* 78 (1983) Nr. 9

Fußnote

- ¹ Spline: in der Steuerungstechnik wird unter Splinefunktion ein Interpolationsverfahren zum Bestimmen von Zwischenpunkten einer zwei- oder dreidimensionalen Kurvenbahn verstanden, die durch nur wenige Stützpunkte vorgegeben ist

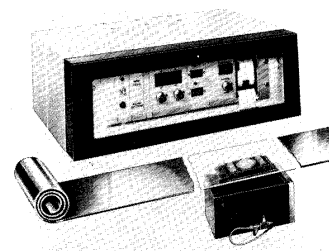


Blechdickenmeßgeräte

Für den Blechverarbeiter ist es aus zweierlei Gründen wichtig, die Dicke des von der Haspel abrollenden Blechbandes zu messen:

- Wird ein Blechcoil nach Gewicht gekauft und liegt die Blechdicke an oder sogar über der oberen Toleranzgrenze, so ergibt es sich, daß die produzierte Stückzahl kleiner als die kalkulierte Stückzahl ist. Mit einer protokollierten Blechdickenmessung kann der Verarbeiter dies gegenüber dem Blechhersteller nachweisen.
- Bleche, deren Dicke außerhalb der Toleranz liegt, können teure Werkzeug- und Maschinenschäden verursachen und zu Ausschub führen.

Aus beiden Gründen werden Blechdickenmeßgeräte zunehmend angewendet. Für Nichteisenmetalle wurde ein neues Blechdickenmeßgerät entwickelt, das mit Wirbelstrom arbeitet und für Blechdicken bis etwa 5 mm geeignet ist (*Bild*). Für ferromagnetische Werkstoffe wird ein Blechdickenmeßgerät angeboten, das nach dem Prinzip der magnetischen Leitfähigkeit arbeitet. Beide Geräte sind in 19"-Modulbauweise aufgebaut und können unterschiedlichen Aufgaben angepaßt werden. Ein Schreiberanschub ermöglicht das kontinuier-



Blechdickenmeßgerät

liche Aufzeichnen der Ist-Blechdicke und damit der Abweichung von der SollDicke. K 1491

(Hersteller: Roland Electronic GmbH, Ettlinger Str. 43, 7538 Kelttern 2, ☎ (07236) 1750, ☐ 783794)